

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「量子状態の高度な制御に基づく革新的
量子技術基盤の創出」
研究課題「オンチップ・イオントラップによる
量子システム集積化」

研究終了報告書

研究期間 2017年 10月～2023年 3月

研究代表者: 田中 歌子
(大阪大学大学院基礎工学研究科、
講師)

§1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本プロジェクトはイオントラップ電極に微細加工技術を取り入れてオンチップ化し、

- 1) 集積化量子システムによる可搬型光クロックの開発
- 2) 微細加工電極がつくる特殊なトラップポテンシャルによる新奇量子システムの実装
- 3) 高性能なトラップデバイス作製の研究開発

を行うものである。

本チームは3つのグループで構成されており、大阪大学グループがオンチップ・イオントラップ実験と系全体の小型化、NICT 小金井グループがトラップデバイス作製と高性能化・高機能化のための研究開発、NICT 神戸グループが光クロック用のレーザーの開発と光源全般の小型化、および光クロック動作検証実験を担当した。

1)では複数個 Ca^+ イオンが光クロックに適用できることを示した。これまでイオンの時計遷移を光周波数の基準として利用する場合には単一イオンが用いられてきた。複数個イオンを用いればレーザー周波数安定化のための誤差信号強度を増強できるため、単一イオンの場合に必要とされてきた大がかりな参照用光共振器の微小光共振器への置き換えが可能になり、系を大幅に小型化できる。しかし複数個 Ca^+ イオンを用いると、個々のイオンの時計遷移周波数シフトが不均一になるという問題があった。本プロジェクトではNICT 神戸グループが、イオンを等間隔に配置する特殊なトラップポテンシャルにおいてはこの周波数シフトが均一になることを見出した。そして大阪大学グループが、この特殊なトラップポテンシャルをオンチップ・イオントラップで生成することに成功した。複数個イオンを光クロックに利用するには他にも様々な課題があるため、NICT 神戸グループでは従来型イオントラップを用いて光クロックの動作検証実験を行った。これらの実験では同グループで開発した小型クロックレーザーが用いられており、200 ms 秒で 2×10^{-12} 程度の安定度が確認されている。さらに改良型の光共振器で Ca^+ イオンへ周波数をロックすることで 1×10^{-13} @1 秒の安定度を得る見通しを得た。これらの実験結果を受けて、大阪大学グループではオンチップ・イオントラップでの時計遷移レーザー周波数のロックを実現し、並行して可搬化のための装置の改良を進めた。これらの実験で用いた小型光源はNICT 神戸グループで開発し大阪大学グループに提供された。

2)では大阪大学グループにおいて、オンチップ・イオントラップ電極を設計し、特殊なポテンシャルによるイオンの間隔制御、 10^2 個のオーダーのイオン列の生成、イオンの2列配列など、微細電極でなければ実現できない量子系を実現した。このようなイオンの配列制御は量子コンピューティング、量子シミュレーションなどの量子技術にも大きく貢献するものである。さらにイオンの2列配列は、ミクロな領域で摩擦力を研究するナノフリクションモデルへ適用できることを示し、オンチップ・イオントラップが幅広い分野で新たな源流をつくる可能性を開いた。

NICT 小金井グループはイオントラップデバイスを作製し大阪大学グループに供給するとともに、3)の高性能なトラップ作製の研究開発を行った。まず基板材料としてSi系材料に注目して絶縁性材料としての課題点を明らかにし、その克服のための張り合わせ型基板を開発した。さらに表面粗さ低減のためのダマシプロセスを開発することにより、単純なメッキプロセスでは実現できない空間均一性、表面粗さを実現するプロセスを確立した。また高機能化のための研究として、イオンローディング貫通穴形成や、オンチップ・イオントラップに光導波路を組み込むために鍵となる2つの光集積化デバイスを試作した。1つは光ファイバーと低損失接続させるためのスポットサイズコンバーター、もう1つはイオンにレーザーを照射するためのグレーティングカップラーで、いずれも Ca^+ イオン用の波長で設計と試作を行い、実用に適う性能が得られた。これらの光集積化デバイスは将来的に全系のオンチップ化につながり大きな意義をもつ。

本プロジェクトではトラップチップ自身の開発に加え、周辺部品の小型化、集積化も進めてきた。イオントラップ実験は超高真空装置内で行われるため特別な配線作業が必要で、このことはイオントラップ技術の普及や将来的な装置の量産化の妨げになるものであった。そこで3つのグループの知見を総合し、配線作業が不要なイオントラップ用汎用パッケージを、国内の産業界との連携により開発した。今後のイオントラップを用いた量子技術におおいに寄与するものと考えられる。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. 複数個カルシウムイオンでの光クロック動作検証

概要:これまでイオンの時計遷移を光周波数の基準として利用する場合には単一イオンが用いられてきた。複数個イオンを用いて信号強度を増強することにより、単一イオンの場合よりも大幅に系を小型化することが可能になるが、課題は複数個 Ca^+ イオンでは、個々のイオンの時計遷移周波数シフトが不均一になることであった。本プロジェクトではイオンを等間隔に配置する特殊なトラップポテンシャルにおいてはこの周波数シフトが均一になることを見出した。さらに従来型イオントラップを用いて光クロックの動作検証実験を行い、複数個イオンで光クロック動作が可能であることを示した。

2. 間隔の制御された多数個イオン配列の実現

概要オンチップ・イオントラップの微細電極の設計と、印加電圧の制御により特殊なポテンシャルを生成し、35個までのイオンの間隔制御、 10^2 個のオーダーのイオン列の生成に成功した。このようなイオンの配列制御は光クロックや超放射レーザーだけでなく、量子コンピューティング、量子シミュレーションなどの量子技術全般へ大きく貢献するものである。

3. 2列配列イオンのナノフリクションモデルへの応用

概要:オンチップ・イオントラップで、従来型トラップでは実現不可能なダブルウェルポテンシャルを生成し、イオンの列間相互作用が有効になる隣接した2列配列を実現した。そしてこの系がマイクロな領域で摩擦を研究するナノフリクションモデルのエミュレータに適用できることを示した。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

1. オンチップ・イオントラップ用光集積化回路デバイス

概要:イオンに照射する光をルーティングする機能を集積化することは、イオントラップとフォトニクスを統合した新しいデバイスの基盤技術としてたいへん重要である。そこで、可視から近赤外線波長域において透明である SiN 光導波路を共集積化するプラットフォームとして選択し、オンチップ・イオントラップに光導波路を組み込むために鍵となる光ファイバーとのインターフェースであるスポットサイズコンバーター、および捕獲イオンに照射するためのグレーティングカップラーの試作を行った。いずれも Ca^+ イオン用の波長で設計と試作を行い、実用に適う性能が得られた。これらの光集積化デバイスは将来的に全系のオンチップ化につながり大きな意義をもつ。

2. 光通信波長帯のレーザーを基本波としたクロックレーザー

概要:小型クロックレーザーの研究開発では、 Ca^+ イオンの時計遷移 729nm を波長 1458nm のレーザーの第二高調波で発生させた。200 ms で 2×10^{-12} 程度の安定度が得られており、さらに改良型の光共振器で Ca^+ イオンへの周波数ロックすることで 1×10^{-13} @1 秒の安定度を得る見通しを得た。基本波が光通信波長帯にあることから、微小共振器、ファイバーカップラー、ファイバー電気光学変調器(EOM)、半導体光アンプ等の小型実装に適した光学部品が標準品と

して入手できることが大きな利点である。また、 Ca^+ の時計遷移に周波数ロックして得られる光クロック信号を光ファイバーで配布する用途にも適しており、将来的に社会実装に適した手法である。

3. オンチップ・イオントラップ汎用パッケージ

概要： オンチップ・イオントラップを用いた系の小型化・集積化のために、汎用型セラミックパッケージおよび超高真空対応ソケットを考案した。一般にイオントラップ電極の実装は、超高真空装置内での配線作業を伴うが、電極数が増えると非常に煩雑な作業となり、量産化とは結び付きにくい形状であった。国内の 2 社との連携により、配線作業が不要で信頼性の高い汎用パッケージを開発した。この成果はオンチップ・イオントラップの普及、それを用いた機器の量産化につながるものである。

< 代表的な論文 >

1. U. Tanaka, M. Nakamura¹, K. Hayasaka, A. Bautista-Salvador, C. Ospelkaus and T. E. Mehlstäubler, "Creation of double-well potentials in a surface-electrode trap towards a nanofriction model emulator", *Quantum Sci. Technol.* **6** 024010 (2021)

概要：

オンチップ・イオントラップで、従来型トラップでは実現不可能なダブルウェルポテンシャルを生成し、イオンの列間相互作用が有効になる隣接した 2 列配列を実現した。そしてこの系がマイクロな領域で摩擦を研究するナノフリクションモデルのエミュレータに適用できることを示した。

§2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 大阪大学グループ(量子システムグループ)

研究代表者：田中 歌子(大阪大学 大学院基礎工学研究科、講師)

研究項目・オンチップ・イオントラップによる新奇量子システムの実現

② NICT 小金井グループ(デバイスグループ)

主たる共同研究者：関根 徳彦(情報通信研究機構 テラヘルツ研究センター テラヘルツ連携研究室 室長)

研究項目・オンチップ・イオントラップデバイスの研究開発

③ NICT 神戸グループ(光クロックグループ)

主たる共同研究者：早坂 和弘(情報通信研究機構 未来 ICT 研究所 副室長)

研究項目・オンチップ・イオントラップによる小型光クロックの研究開発

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

1. 光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)

技術領域「量子情報処理(主に量子シミュレータ・量子コンピュータ)」基礎基盤研究

研究開発課題「冷却イオンによる多自由度複合量子シミュレータ」研究代表者 豊田健二(大阪大学)

・多数個イオン配列制御技術の量子シミュレータへの展開

本プロジェクトで開発した多数個イオンの配列制御技術、具体的には 100 個のイオンの 1 列配列実現や、イオン間の間隔制御の技術は、冷却イオンを用いた量子シミュレータを多数個イオンに展開するために不可欠な技術である。Q-LEAP の研究開発課題との連携では、イオン配列制御技術を提供するとともに、多数個イオンの安定動作のためのクライオジェニック・イオントラップシステムの開発を進めている。

2. ムーンショット型研究開発制度

研究開発プログラム「2050 年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現」

研究開発プロジェクト「イオントラップによる光接続型誤り耐性量子コンピュータ」研究代表者 高橋優樹(沖縄科学技術大学院大学)

・トラップポテンシャル生成の手法のイオン輸送技術への応用

本プロジェクトで開発したトラップポテンシャル生成や操作の手法は、ムーンショット研究開発プロジェクトにおいて重要な、イオントラップモジュール間のイオン輸送技術に応用できる。そこで 2022 年度から、イオンの高速輸送のための技術開発、ジャンクション型のオンチップ・イオントラップ開発を開始した。

・2次元配列の大規模量子コンピュータへの応用

本プロジェクトの新奇量子システムとして進めた 2 次元配列は、量子コンピュータの大規模化に利用できる。現状よりもさらに多数個の 2 次元配列を実現するオンチップ・イオントラップ開発を開始した。

・イオントラップ用汎用パッケージの開発と国内イオントラップコミュニティへの提供

本プロジェクトではトラップチップ自身の開発に加え、周辺の小型化、集積化を進めてきた。一般にイオントラップ電極の実装では超高真空装置内での配線作業が必要だが、本プロジェクトでは、様々なトラップ電極に対応でき、煩雑な配線作業を不要にするイオントラップ用汎用パッケージを国内の産業界との連携により開発している(次項3参照)。この汎用パッケージは本 CREST プロジェクトの大阪大学と NICT だけでなく、ムーンショット研究開発プロジェクトに参画している他の研究機関(量子科学技術研究開発機構、東京大学など)とも共有する予定で、国内のイオントラップを用いた量子技術に大きく貢献するものである。

3. 国内企業との連携

・イオントラップ用汎用パッケージの開発

オンチップ・イオントラップの系の小型化・集積化のために、汎用型セラミックパッケージおよび超高真空対応ソケットを、国内の企業とともに開発している。一般にイオントラップ電極の実装は、超高真空装置内での配線作業を伴うが、電極数が増えると非常に煩雑な作業となり、量産化とは結び付きにくい形状であった。国内の 2 社との連携により、配線作業が不要な汎用パッケージを開発することに見通しがたった。オンチップ・イオントラップの普及、それを用いた機器の量産化につながるものである。